

白云岩地区土壤呼吸日变化及其 与土壤温湿度的响应关系

朱粲粲 周忠发 汤云涛 薛冰清 范宝祥 郑维熙¹

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001)

【摘要】: 为揭示贵州绥阳双河洞国家地质公园白云岩地区表层土壤呼吸作用昼夜变化特征及其影响因素。研究利用土壤呼吸测量系统(SRS-SD2000, ADC, UK), 在无降水影响下监测了双河洞国家地质公园岩溶地区灌木林地、竹林、旱地和人工草地 4 种不同土地利用方式的表层土壤呼吸通量昼夜变化特征, 结合土壤温湿度和大气温湿度等环境参数, 探究影响土壤呼吸昼夜变化的关键因素。结果表明: 4 种不同土地利用方式土壤呼吸速率变化均呈“昼高夜低”的单峰型变化规律, 日变化最大值出现在 12:00~14:00 之间, 最低值出现在 5:00~7:00 之间; 各样地土壤呼吸速率和土壤温度均呈现显著的正相关关系($P < 0.001$), 灌木林地、竹林和旱地土壤呼吸速率与土壤湿度有显著负相关关系($P < 0.001$), 人工草地土壤呼吸与土壤湿度之间有低度相关性($P < 0.05$); 气温是影响土壤呼吸速率变化的关键因子, 实测数据表明土壤呼吸在达到峰值后不会随着气温的升高而增大; 不同样地类型的土壤呼吸速率对土壤温度和湿度的昼夜响应特征存在差异。

【关键词】: 白云岩地区 土地利用 昼夜变化 土壤湿度

【中图分类号】: S154 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-1947-10

土壤呼吸是土壤碳库和大气碳库之间碳流通最主要的途径和类型^[1,2]。土壤呼吸作用对大气 CO₂ 浓度的变化起着举足轻重的作用^[3], 即使它发生细微的变动, 也会明显改变大气中 CO₂ 浓度和全球碳循环过程, 从而影响全球气候环境变化^[4]。研究表明, 土壤碳库改变 0.1% 将会使得大气圈 CO₂ 浓度发生 1mg/L 的变化, 从而影响全球气候变暖进程^[5]。土壤呼吸强度及其变化特征为全球碳平衡预算、估测及其变化研究提供了数据基础^[6]。早在 20 世纪初, 国外就开展了对土壤呼吸的研究, 研究主要集中在亚热带、温带森林^[7]和印度热带草原^[8]。我国土壤呼吸研究起步较晚, 在近二十年来, 研究主要针对北方森林^[9]、亚热带森林^[10,11]、黄土区^[12]、湿地^[13]和西藏高寒草原^[14]开展了一些研究工作。现阶段国内针对土壤呼吸的研究大部分集中在草原生态系统^[15]及北方森林生态系统^[16]。研究表明, 土壤呼吸的变化受植物群落、物候阶段、微生物生物量等生物因子和气候条件、土壤环境、地形等非生物因子的影响, 具有一定的时空变异性^[17]。目前, Davidson 等^[18]大多数研究认为土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸最重要的环境因子。不同陆地生态系统条件下, 土壤呼吸作用强度不同, 与环境等因素的响应关系也存在一定差异^[19]。我国岩溶地区碳汇效应显著, 土壤与矿物固碳潜力巨大^[20], 但目前对岩溶地区不同地表覆被下土壤呼吸变化特征所开展的相关研究还鲜有报道。

作者简介: 朱粲粲(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地图学与地理信息系统. E-mail: zhucan199610@163.com
周忠发 E-mail: fa6897@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361081, 41661088); 贵州师范大学资助博士科研项目(GZNUD[2017]6号); 贵州省高层次创新型人才培养计划(黔科合平台人才[2016]5674)

本文选择贵州省遵义市绥阳县双河洞国家地质公园典型白云岩地区 4 种不同土地利用方式为研究对象, 采用定位连续观测的方式研究了不同土地利用方式土壤呼吸的昼夜变化特征及其与主要影响因子的关系, 旨在了解短时间尺度下不同植被类型土壤碳释放的特征和差异, 为精确估计区域土壤碳收支变化提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

双河国家地质公园位于贵州省遵义市绥阳县温泉镇境内(东经 107° 02' 30" ~107° 25' 00", 北纬 28° 08' 00" ~28° 20' 00"), 是乌江一级支流芙蓉江的发源地。该地区属于中亚热带季风气候, 兼有亚热带山地季风气候, 雨热同期, 四季分明, 最高气温常出现在 7 月, 平均温度为 22.5°C, 最低温度常出现在 1 月, 平均温度约 1.6°C。降雨主要集中于每年 4~10 月, 年降水量为 1210mm。研究区 70%以上的区域属于喀斯特地貌, 主要有峰丛洼地、峰丛谷地、盲谷、天坑、落水洞、竖井、地下河等喀斯特地貌类型, 构成较典型的喀斯特地区二元立体三维结构的地貌特征。研究区出露地层主要以奥陶系桐梓组的白云岩、白云质灰岩、泥灰岩等碳酸盐岩为主。区域内有较多的分水岭及洞穴分布, 因其中含有石膏, 溶蚀强烈。地下水主要为碳酸盐岩裂隙洞穴水、碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙洞穴水及碎屑岩裂隙水等类型。研究区内的土壤垂直分带十分明显, 在海拔 1400m 以下地带以黄壤、石灰土为主, 1400m 以上地区主要为山地黄棕壤^[21]。

本研究根据 GB/T21010-2017《土地利用现状分类》二级类分类标准, 在研究区共设置了 4 个不同土地利用方式的土壤监测点, 分别是灌木林地、竹林、旱地和人工草地, 研究点位于双河洞国家地质公园地下裂缝景区附近。如表 1 所示, 4 种样地皆为石灰土土壤类型, 海拔在 670m 至 700m 之间。按照土壤监测时期大气温度变化, 下午 18:00 以后气温开始降低, 次日 6:00 气温开始回升, 因此 6:00 至 18:00 划分为白天, 夜间时段从 18:00 至次日 6:00。

表 1 土壤监测点基础信息表

土地利用方式	土壤类型	海拔 (m)	经度	纬度
灌木林地	石灰土	685	107° 18' 13.15" E	28° 14' 22.27" N
竹林	石灰土	698	107° 18' 0.15" E	28° 14' 21.32" N
旱地	石灰土	673	107° 18' 15.31" E	28° 14' 22.04" N
人工草地	石灰土	672	107° 18' 16.88" E	28° 14' 20.29" N

1.2 研究方法

在各待测样地提前一小时安置 1 个直径为 13cm、高 7.5cm 的不锈钢环刀, 安置环刀之前, 先用剪刀贴着地面剪去待测样地上覆的植物, 以减少土壤扰动对土壤呼吸测定的影响, 采用便携式土壤呼吸测量系统(SRS-SD2000, ADC, UK)对土壤呼吸速率进行测定, 该系统由一个触摸屏控制台、一个手柄和一个 1L 的土壤呼吸室组成, 手柄内安装有高精度微型 CO₂ 红外气体分析仪, 精度为 1ppm。从 2019 年 8 月 18 日上午 8 时至 22 日上午 8 时, 分别对灌木林地、竹林、旱地和人工草地的土壤呼吸速率进行 24h 连续监测, 每隔 5 分钟记录一次数据, 取每小时平均值。此时段前后皆无降雨影响, 期间气候条件相近。为减少样地间小气候和地形的差异, 4 种土地利用方式相邻, 海拔、土壤类型和坡向均相近。采用环刀法, 利用容积为 100cm³ 的环刀分别取 4 种土地利用方式的表层土样, 现场用天平称其原始土壤重量, 实验室内采用烘箱 80°C 温度将土样烘干至恒重, 称量烘干后土样重量, 计算其土壤容重、土壤孔隙度^[22]和田间持水量^[23]。土壤化学性质是将土壤样品送至贵州省贵阳市中科院地球化学研究所国家重

点实验室进行测定。其中土壤有机含量测定是采用德国 elementar 公司 vario MACRO cube 型号有机元素分析仪, 检测限: C、N<10ppm(约 300mg 土壤), 检测精度为: <0.5%rel。主要元素采用美国 PE 公司生产的火焰原子吸收分光光度计测定, 检出限(Cu)0.006 μg/ml, 精密度 RSD≤1%, 波长精确度±0.20nm。

气象数据使用美国 Kestrel-4500 型便携式小型气象站对大气中的温度、相对湿度等因子进行连续性监测, 仪器的测量精度分别为: ±1.0℃、±3%、±3%, 分辨率分别为 0.1℃、0.1%、0.1m/s。大气 CO₂ 浓度的连续监测是采用美国 Telaire-7001 型便携式红外 CO₂ 仪, 同时外接美国 ONSET 公司 HOB0 自动记录仪(U12-012), 其中 CO₂ 浓度范围在 0~10%, 测量精度为±0.05%, 分辨率为 0.001%, 温度测定范围为-20~70℃, 精度为±0.35℃, 监测前用标准(380mg/L)气体进行校准。WET-2 土壤三参数仪测量地表(5cm)土壤湿度、土壤温度。

2 结果与分析

2.1 土壤物理化学性质特征

由表 2 可知, 4 种样地土壤 pH 均为中性或偏碱。土壤容重呈人工草地>灌木林地>竹林>旱地, 而土壤总孔隙度与土壤容重相反, 表现为旱地>竹林>灌木林地>人工草地。灌木林地的田间持水量最大, 为 36.52%, 其次为人工草地、竹林和旱地, 分别为 29.08、27.59 和 25.18%, 后 3 种样地田间持水量差异较小。竹林表层土壤有机碳含量最高, 为 23.14g/kg, 其次为灌木林地、人工草地和旱地。竹林和灌木林植被根系较为发达, 土壤有机碳含量相对较高。

表 2 不同土地利用方式土壤基本理化性质

土地利用方式	土壤容重(g·cm ⁻³)	土壤总孔隙度(%)	田间持水量(%)	土壤有机碳(g·kg ⁻¹)	pH
灌木林地	1.50	44.46	36.52	19.77	7.5
竹林	1.38	48.41	27.59	23.14	8.1
旱地	1.32	50.39	25.18	3.29	7.1
人工草地	1.73	36.87	29.08	8.59	7.0

2.2 环境因子昼夜变化特征

由图 1 可看出, 灌木林地、竹林、旱地和人工草地 4 种土地利用方式在监测时段内的大气温度均呈现先增大后减小的变化趋势, 且大气温度变化不存在显著差异, 白天逐渐升高, 夜晚逐渐降低, 大气温度的变化在 22.5℃~34.8℃, 下午 15:00 至 16:00 值最高, 平均为 34.6℃, 次日清晨 6:00 温度最低, 平均为 23.0℃。4 种土地利用方式大气湿度变化也不存在显著差异, 均呈现先减小后增大的变化趋势, 变化范围在 40.2%~85.5%, 16:00 大气湿度最低, 平均为 42.1%, 最高值出现在 6:00, 平均为 84.3%。大气湿度均呈现明显的昼夜变化规律。大气 CO₂ 浓度变化范围为 367×10⁻⁶~442×10⁻⁶vol.%, 平均浓度为 400×10⁻⁶vol.%。大气 CO₂ 浓度昼夜变化趋势与土壤湿度变化趋势一致, 白天大气 CO₂ 低于夜间。有研究发现, 大气 CO₂ 升高会对土壤呼吸产生抑制作用^[24, 25]。

监测时段内, 4 种土地利用方式的土壤温度昼夜变化明显, 均呈现出单峰型的变化规律, 白天土壤温度逐渐升高, 夜晚降低, 可见土壤温度变化是受大气温度升降的影响, 两者变化趋势一致。白天 4 种土地利用方式的平均土壤温度分别为 24.6、23.8、29.7 和 27.8℃, 夜间分别为 23.9、23.3、27.9 和 25.9℃, 白天土壤温度均高于夜间。其中旱地土壤温度昼夜变化最为显著, 最

高温度 33.8℃ 出现在下午 15:00, 最低温 25.3℃ 出现在早晨 7:00, 平均温度为 28.8℃。其次是人工草地, 中午 13:00 土壤温度最高, 7:00 土壤温度达到最低, 变化范围在 24.2~30.8℃。灌木林地和竹林土壤温度变化幅度较小, 变化趋势类似(图 1), 最高值均出现在下午 16:00, 最低值皆在早晨 6:00。灌木林地土壤温度变化幅度为 2.9℃, 竹林为 2.2℃。受冠层和茎高影响, 灌木和竹林地样点的土壤温度变化较平稳, 而竹林茎高高于灌木林地, 郁阴度大, 土壤表层接受太阳光辐射的面积小, 因此竹林样点土壤温度变化最为平缓, 且两个样点土壤温度对大气温度的响应存在滞后性。

4 种土壤湿度昼夜变化趋势一致, 从灌木林地、竹林、旱地到人工草地, 白天土壤湿度的平均值分别为 9.9、9.1、4.9 和 12.7%, 夜间平均值分别为 10.9、10.4、5.0 和 13.3%, 夜间平均土壤湿度皆高于白天。土壤湿度最低值均出现在下午大气温度最高时, 值分别为 8.7、6.8、2.3、10.3%, 在早晨 7:00 达到最高值, 分别为 11.6、11.2、6.3、14.1%。旱地由于土壤孔隙度较大, 表面无植被覆盖, 其土壤湿度变化与外界气候环境变化一致。人工草地植被密度较高, 土壤孔隙度小, 保水性较好, 因此人工草地的土壤湿度较高且受气温影响变化较小, 且最低土壤湿度出现在最高土壤温度之后, 对土壤温度变化有滞后效应。

2.3 土壤呼吸作用昼夜变化特征

以单位时间、单位面积内土壤释放的 CO₂ 量来表示土壤呼吸速率, 如图 1 所示, 4 种土地利用方式的土壤呼吸速率的变化与大气温度和土壤温度变化趋势类似。太阳辐射的昼夜变化引起大气温度的昼夜变化, 从而引起土壤温度、植物根系和土壤生物(尤其土壤微生物)活动强度的变化, 进而引起土壤呼吸速率的昼夜变化^[26]。如图 1 和表 3 显示, 不同土地利用方式土壤呼吸速率的最高值、最低值和变化幅度不同。灌木林地、竹林、旱地和人工草地土壤呼吸速率日变化范围分别为 0.06~2.38、4.41~6.54、-0.05~0.72 和 1.81~4.68 μmol·m⁻²·s⁻¹, 白天土壤呼吸平均速率分别为 1.99、6.17、0.38 和 3.45 μmol·m⁻²·s⁻¹, 夜间为 0.80、4.96、-0.03 和 2.24 μmol·m⁻²·s⁻¹, 白天平均土壤呼吸速率均高于夜间。人工草地土壤呼吸作用呈明显的昼夜变化规律, 在 13:00 达到最高值, 7:00 达到最低值, 平均速率为 2.84 μmol·m⁻²·s⁻¹。其次为竹林和灌木林地, 最高值分别出现在 13:00 和 14:00, 均在 5:00 达到最低值, 平均速率分别为 5.56 和 1.39 μmol·m⁻²·s⁻¹。旱地土壤呼吸速率昼夜变化幅度最小, 平均速率为 0.18 μmol·m⁻²·s⁻¹, 最高值出现在中午 12:00, 5:00 出现最低值。与其他土地利用方式相比, 旱地的土壤呼吸速率显著较低, 这与旱地内无农作物种植和人为耕作导致旱地土壤总孔隙度较大有关。土壤呼吸作用总体上呈现出白天土壤呼吸速率大, 变化幅度也较大; 夜晚土壤呼吸速率相对较小, 变化幅度也较小的变化规律。而且土壤温度升高的时段, 土壤呼吸速率也逐渐升高达到最高值。由此可见, 在昼夜短时间尺度变化上, 温度是导致土壤呼吸作用发生改变的主要控制因素。温度的升高会促进土壤微生物的活性和加速土壤有机质发生分解, 并且增强土壤根系呼吸作用, 进而加快土壤呼吸速率^[27]。

表 3 不同土地利用方式土壤呼吸速率昼夜变化幅度

土地利用	最高值 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	最低值 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	平均值 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	幅度 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	白天平均值 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	白天标准差	夜间平均值 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	夜间标准差
灌木林地	2.38	0.60	1.39	1.78	1.99	0.54	0.80	0.21
竹林	6.54	4.41	5.56	2.13	6.17	0.61	4.96	0.44
旱地	0.72	-0.05	0.18	0.77	0.38	0.31	-0.03	0.05
人工草地	4.68	1.81	2.84	2.87	3.45	1.00	2.24	0.25

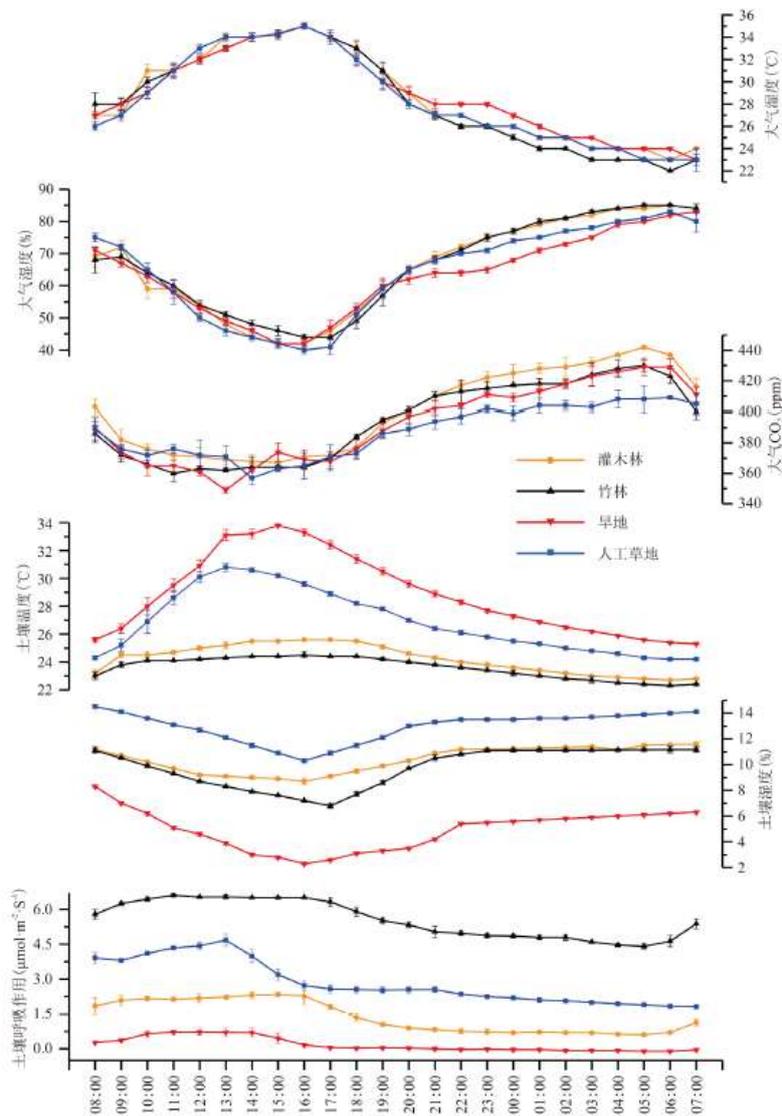


图 1 大气温度、湿度、CO₂、土壤温湿度和土壤呼吸作用昼夜变化

通过对贵州省绥阳县双河洞国家地质公园灌木林地、竹林、旱地和人工草地表层土壤呼吸作用的日监测研究发现，白天土壤呼吸速率及其变化幅度较大，夜间土壤呼吸速率较小。在短时间监测尺度下，土壤有机质和土壤植被等变化很小，因而土壤呼吸速率的强弱变化主要受土壤温度和土壤湿度两个因素的影响。

根据表 4 可得，土壤温度与土壤湿度呈极显著负相关关系，土壤呼吸作用与土壤温度呈正相关关系，与土壤湿度呈负相关关系。不同土地利用方式样地的土壤呼吸作用与土壤温、湿度之间的相关程度存在一定差异，尤其是人工草地和旱地的土壤呼吸与土壤湿度的相关性较弱，可能是受人为活动影响、上覆植被发育较差受外界气候影响程度较大导致。其中，灌木林地、竹林和人工草地的土壤呼吸作用与土壤温度呈显著正相关，相关系数分别为 0.799、0.820 和 0.764，旱地的土壤呼吸作用与土壤温度正相关关系较其他 3 种样地小，为 0.688。灌木林地与竹林与的土壤呼吸作用强度与土壤湿度呈极显著负相关关系，相关系数分别为 -0.836 和 -0.805，而旱地和人工草地的土壤呼吸作用与土壤湿度相关性相对较弱，呈低度负相关关系，相关系数为 -0.526 和 -0.496。灌木林地、旱地和人工草地的土壤呼吸作用与土壤湿度有显著正相关关系，竹林的土壤呼吸作用与土壤湿度呈极显著正相关。

表 4 土壤呼吸速率与温、湿度相关性表

	土壤湿度				土壤温度				土壤呼吸作用			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
土壤湿度	1	1	1	1	-0.951**	-0.990**	-0.926**	-0.916**	-0.836**	-0.805**	-0.526**	-0.496*
土壤温度					1	1	1	1	0.799**	0.820**	0.688**	0.764**
土壤呼吸作用									1	1	1	1

2.4 不同土地利用方式土壤呼吸对土壤温、湿度变化的响应

如图 2 所示，总体上，白天和夜间 4 种样地的土壤呼吸与土壤温度皆呈正相关关系。其中灌木林地白天土壤呼吸随土壤温度变化幅度较夜间大，白天变化较为复杂， R^2 为 0.790，而夜间土壤呼吸与土壤温度相关性为 0.859。竹林表层土壤呼吸与土壤温度的响应关系无论是白天还是夜间都有极显著正相关关系，相对灌木林地，白天竹林地土壤呼吸响应土壤温度变化较好。旱地和人工草地的土壤呼吸对土壤温度昼夜变化响应较为明显，白天呈微弱相关，夜间呈极显著相关。4 种不同土地利用方式土壤呼吸对土壤温度变化皆为夜间相关性高于白天，说明夜间土壤对土壤温度的响应较好。白天土壤温度随气温变化幅度大，使得土壤呼吸作用变化较为复杂，且土壤呼吸随着土壤温度的持续升高，也会出现一定减弱趋势，说明土壤呼吸随温度变化存在一定的临界值，可能与土壤微生物习性和不同种植被呼吸特征有关。而夜晚土壤温度变化较为稳定，土壤呼吸变化也相对比较平稳，这也与夜晚土壤微生物活性和土壤根系等土壤呼吸作用较弱有关。

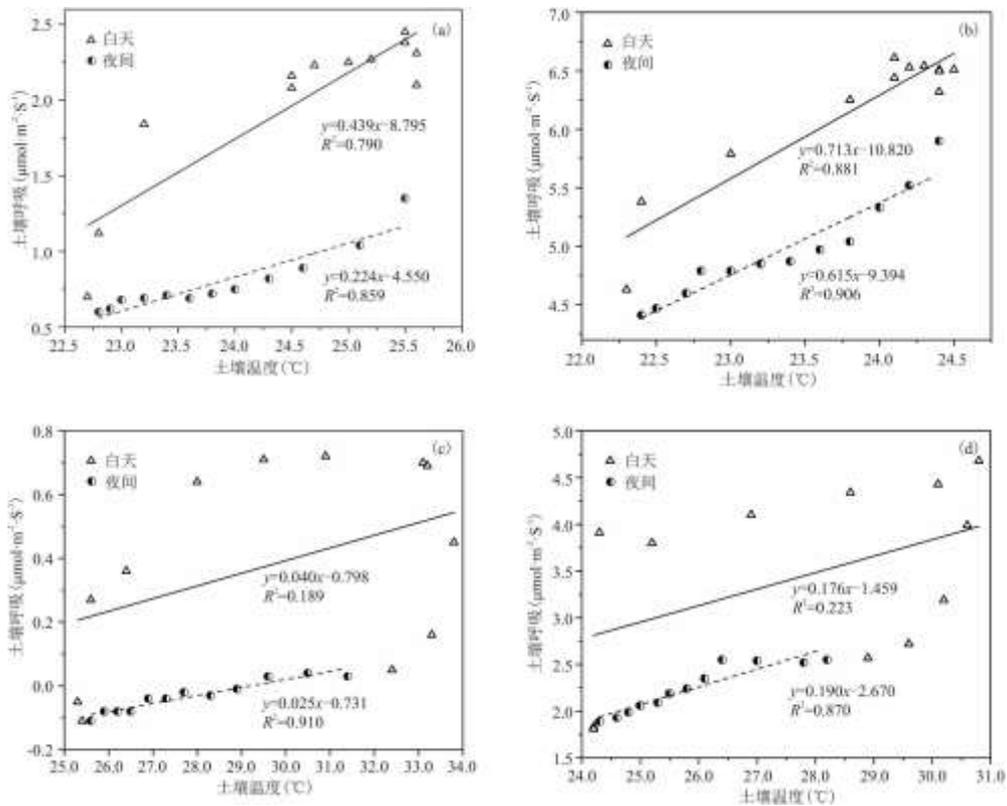


图 2 土壤呼吸对土壤温度昼夜变化响应图

注：a 表示灌木林地，b 表示竹林，c 旱地，d 表示人工草地。

如图 3 所示，灌木林地土壤呼吸对土壤湿度变化的响应，白天呈显著负相关，而夜间呈极显著负相关关系。竹林地土壤呼吸对土壤湿度昼夜变化响应不同于其它 3 个样地，其白天 R^2 为 0.877，大于夜间的 0.486，说明白天竹林表层土壤呼吸受土壤温度和土壤湿度的共同调控，夜间的变化主要受土壤温度影响。而旱地和人工草地白天土壤呼吸与土壤湿度几乎没有线性关系，说明白天两者的土壤呼吸主要受土壤温度影响较大。夜间旱地土壤呼吸与土壤湿度变化呈极显著负相关，人工草地呈显著相关。4 种不同土地利用方式土壤呼吸作用在夜间均与壤湿度变化呈负相关关系，有较好的线性关系，而白天受土壤温度影响较大，旱地和人工草地白天土壤呼吸作用与土壤湿度变化关系无明显特征。

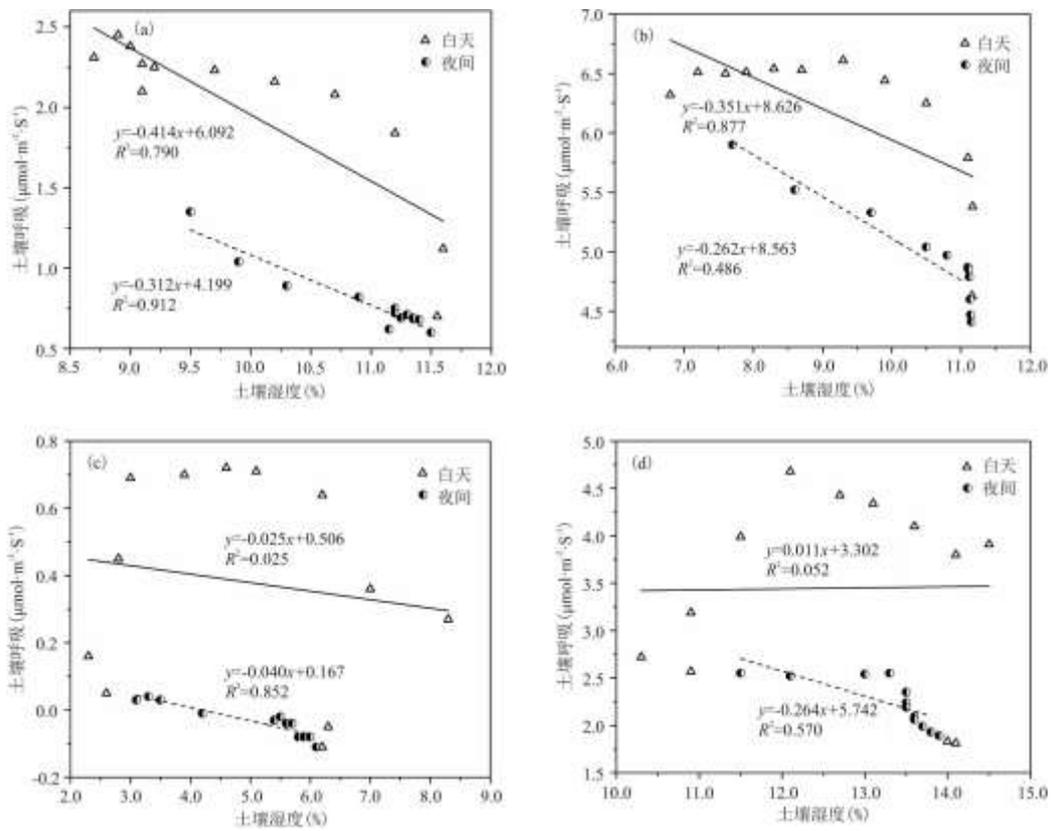


图 3 土壤呼吸对土壤湿度昼夜变化响应图

注：a 表示灌木林地，b 表示竹林，c 旱地，d 表示人工草地。

3 讨论

该研究区的土壤呼吸作用均呈现单峰型日变化规律，峰值出现在 12:00~14:00，最小值出现在 6:00~7:00，与刘惠^[28]对华南丘陵区和张俞^[29]对贵州省查耳岩村的土壤呼吸日变化特征研究相似。灌木林地、竹林、旱地和人工草地平均土壤呼吸速率分别为 1.39、5.56、0.18、2.84 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，土壤有机碳含量分别为 19.77、23.14、3.29、8.59 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，表明不同土地利用方式的土壤呼吸强度存在差异，其中旱地土壤呼吸作用和土壤有机碳含量最弱，而竹林和灌木林地土壤呼吸作用和土壤有机碳

含量远高于旱地,说明人类耕作等剧烈人为活动会造成土壤有机质含量降低导致土壤碳的输入减少,增大土壤成为碳源的风险,如土地利用方式不同,地表凋落物、植物根系生长和分布、微生物活性和含量^[30]不同,进而导致土壤呼吸作用强度存在差异,与牛瑞雪^[31]、吴建国^[26]、韩乐^[32]等研究结果相似。

在土壤呼吸作用峰值时段内大气温度也处于高值,表明土壤呼吸的日变化和气温呈显著正相关性,因而在大气温度出现高值的时段出现土壤呼吸最大值,该研究成果与吴夏等^[2]对桂林毛村地区和龚斌等^[10]对中亚热带气候地区的土壤呼吸日变化规律的研究结果相似。本研究区 4 种土地利用方式所在的土壤温度和湿度均存在明显的日变化规律。四者的土壤温度均呈现出明显的单峰曲线,但达到峰值的时间不同,灌木林地和竹林土壤温度在 16:00 达到最高值,旱地在 15:00 达到峰值,人工草地在 13:00 土壤温度达到峰值。这是由于各土壤覆被不同,受植被冠层和茎高影响,竹林与灌木林郁闭度较高,导致土壤温度达到峰值的时间滞后,而人工草地和旱地土壤温度则对大气温度的响应较快,加之两者植被发育良好,根系发达,保水性能、土壤结构等较受人为扰动大的人工草地和旱地好,导致不同土地利用方式样地的土壤呼吸作用与土壤温、湿度之间的相关程度存在差异。本试验结果针对短时间不同土地利用方式土壤呼吸的变化特征及其差异,主要考虑温、湿度变化对土壤呼吸速率的影响,未考虑土壤有机质、微生物含量等的变化对其强度的影响,需在今后研究中进一步探明影响机制。

4 结论

(1) 本文研究的白云岩喀斯特地区 4 种不同土地利用方式的土壤呼吸皆具有一定的昼夜变化规律,均呈现出昼高夜低的单峰型的演变规律。在没有降水条件影响下,土壤呼吸作用强度及其变化幅度均为白天大于夜间,4 种样地土壤呼吸作用在下午 12:00 至 14:00 达到最大值,在 5:00~7:00 达到最小值。4 种样地的平均土壤呼吸作用由强到弱为竹林>人工草地>灌木林地>旱地,变化幅度由大到小为人工草地>竹林>灌木林地>旱地。

(2) 在昼夜尺度下,研究区土壤呼吸作用变化和土壤温度均呈显著的正相关关系($P<0.001$),灌木林地、竹林和旱地土壤呼吸速率与土壤湿度有显著负相关关系($P<0.001$),人工草地土壤呼吸与土壤湿度之间有低度相关性($P<0.05$)。白天土壤呼吸作用受土壤温度和土壤湿度的影响变化较为复杂,夜间土壤呼吸作用较为稳定,夜间相关土壤呼吸对土壤温度变化的相关系数大于对土壤湿度变化的相关系数。由此可见,在无降水影响下,大气温度是控制土壤呼吸作用昼夜变化的最关键因子。

(3) 通过对比大气温度、土壤温度和土壤呼吸作用的峰值,土壤呼吸作用在达到峰值后并不会随着气温的升高而增大,气温在 15:00~16:00 达到最高值,但土壤呼吸作用在 12:00~14:00 间就到达已达最大值,往后随着气温的增加土壤呼吸速率开始减小。

参考文献:

- [1]SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry (Dordrecht), 2000, 48(1):7-20.
- [2]吴夏,潘谋成,曹建华,等.典型岩溶区土壤呼吸作用的昼夜变化特征及其影响因素[J].中国岩溶, 2019, 38(2):157-163.
- [3]RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2):81-99.
- [4]吴雅琼,刘国华,傅伯杰,等.中国森林生态系统土壤 CO₂ 释放分布规律及其影响因素[J].生态学报, 2007, 5:2126-2135.
- [5]潘根兴,张旭辉,张平究,等.中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J].地球科学进展, 2003, 18(4):

609-618.

[6]BUCHMANN N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11-12):0-1635.

[7]DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil Water Content and Temperature as Independent or Confounded Factors Controlling Soil Respiration in a Temperate Mixed Hardwood Forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2):217-227.

[8]张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7):778-785.

[9]郑鹏飞, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区不同植被类型的土壤呼吸特征及其温度敏感性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5):307-315.

[10]龚斌, 王风玉, 张继平, 等. 中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系[J]. *生态环境学报*, 2013(8):1275-1281.

[11]马明, 王定勇, 申源源, 等. 中亚热带阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(1):85-92.

[12]周小刚. 黄土区不同生态系统土壤呼吸特征及其影响因素[D]. 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.

[13]朱丽辉, 徐瑶, 杜忠. 若尔盖高寒湿地土壤呼吸及影响因素研究[J]. *绿色科技*, 2019(12).

[14]石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 等. 西藏高原草原化嵩草草甸生态系统 CO₂ 净交换及其影响因子[J]. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(s1):194.

[15]刘合满, 曹丽花, 马和平. 土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J]. *水土保持学报*, 2013(1):193-196.

[16]颜学佳. 大兴安岭南段次生林土壤呼吸对改变碳输入的响应[D]. 内蒙古农业大学, 2014.

[17]梁福源, 宋林华, 王静. 土壤 CO₂ 浓度昼夜变化及其对土壤 CO₂ 排放量的影响[J]. *地理科学进展*, 2003(2):170-176.

[18]DAVIDSON E A, VERCHOT L V, J. HENRIQUE C, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):53-69.

[19]IVANOV D, TATARINOV F, KURBATOVA J. Soil respiration in paludified forests of European Russia[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019(2).

[20]吴夏, 潘谋成, 朱晓燕, 等. 夏季降水对岩溶表层带土壤呼吸作用的影响[J]. *南方农业学报*, 2015(4):43-48.

[21]李坡, 贺卫, 钱治, 等. 双河洞地质公园研究[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2008:16-75.

[22]中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978:1-226.

-
- [23]袁娜娜.室内环刀法测定土壤田间持水量[J].中国新技术新产品,2014(9):184-184.
- [24]张容娟.土地利用方式对土壤有机碳和土壤呼吸的影响[D].复旦大学,2009.
- [25]刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].生态学报,1997(5):19-26.
- [26]吴建国,张小全,徐德应.六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局[J].环境科学,2003,24(6).
- [27]张燕,张振华,姚付启,等.土壤温度相对于气象因子的滞后效应分析[J].农业现代化研究,2008,29(4):468-470.
- [28]刘惠,赵平.华南丘陵区典型土地利用类型土壤呼吸日变化[J].生态环境,2008,17(1):249-2557.
- [29]张俞,熊康宁,喻阳华,等.中国南方喀斯特石漠化地区3种经济林土壤呼吸日动态特征[J].中南林业科技大学学报,2019,39(1):92-99.
- [30]颜雄,李文昭,罗璇,等.不同土地利用方式下土壤有机碳的垂直分布特征研究[J].农业与技术,2020,40(14):13-15.
- [31]牛瑞雪,刘继亮,胡彦萍,等.黑河中游不同土地覆被类型土壤呼吸及对水热因子的响应[J].中国沙漠,2017,37(5):961-969.
- [32]韩乐,苏永红,王尚涛,等.敦煌葡萄园地土壤呼吸特征及其与水热因子的关系[J].干旱区资源与环境,2020,34(7):185-193.